

*С.С. РУДЕНКО, Д.Г. КОЛУШКО, О.Є. ІСТОМІН***РОЗРАХУНОК ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «LIGRO»**

Заземлювальний пристрій діючих електроустановок напругою понад 1 кВ представляє собою складну технічну систему, з розгалуженою сіткою горизонтальних та вертикальних заземлювачів. Моделювання аварійних режимів роботи для визначення його працездатності виконується при реальному струмі короткого замикання й дозволяє визначити значення його нормованих параметрів. Метою роботи є розробка тестової версії програмного комплексу для визначення нормованих параметрів заземлювального пристрою. У статті наведено алгоритм роботи розрахункової частини програмного комплексу та зроблено порівняльний аналіз з існуючими світовими аналогами. Було порівняно отримані експериментальним шляхом значення опору заземлювального пристрою з отриманими розрахунковим способом за допомогою двошарової моделі програмного комплексу «Grounding 1.0» та за допомогою створеного комплексу «LiGro» для вибірки з 70 підстанцій.

Ключові слова: електробезпека, заземлювальний пристрій, напруга дотику, коротке замикання, моделювання, програмний комплекс.

*С.С. РУДЕНКО, Д.Г. КОЛУШКО, А.Е. ИСТОМИН***РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «LIGRO»**

Заземляющего устройства действующих электроустановок напряжением выше 1 кВ представляет собой сложную техническую систему, с разветвленной сетью горизонтальных и вертикальных заземлителей. Моделирование аварийных режимов работы для определения его работоспособности выполняется при реальном токе короткого замыкания и позволяет определить значение его нормируемых параметров. Целью работы является разработка тестовой версии программного комплекса для определения нормируемых параметров заземляющего устройства. В статье приведен алгоритм работы расчетной части программного комплекса и сделан сравнительный анализ с существующими мировыми аналогами. Было выполнено сравнение полученных экспериментальным путем значений сопротивления заземляющего устройства с полученным расчетным способом с помощью двухслойной модели программного комплекса «Grounding 1.0» и с помощью созданного комплекса «LiGro» для выборки из 70 подстанций.

Ключевые слова: электробезопасность, заземляющее устройства, напряжение прикосновения, короткое замыкание, моделирование, программный комплекс

*S.S. RUDENKO, D.G. KOLIUSHKO, A.E. ISTOMIN***CALCULATION OF GROUNDING DEVICES USING THE "LIGRO" SOFTWARE COMPLEX**

The grounding device of existing electrical installations with voltages above 1 kV is a complex technical system with an extensive grid of horizontal and vertical grounding conductors. Modeling of emergency operation modes to determine its operability is performed with a real short circuit current and allows you to determine the value of its normalized parameters. The purpose of the work is to develop a test version of the software package for determining the normalized parameters of the grounding device. The article presents the algorithm of the calculation part of the software package and makes a comparative analysis with existing world analogues. The experimental values of the resistance of the grounding device were compared with the calculated method using a two-layer model of the Grounding 1.0 software package and using the created "LiGro" complex for a sample of 70 substations.

Key words: electrical safety, grounding devices, touch voltage, short circuit, modeling, software package

Постановка проблеми. Безпечна експлуатація й нормальна робота енергетичних об'єктів (електричних станцій та підстанцій, промислових підприємств тощо) у значній мірі визначаються працездатністю заземлювального пристрою (ЗП). В якості її оцінки використовують нормовані параметри (НП), що періодично контролюються протягом всього строку експлуатації електроустановки. До них відносять: опір ЗП, напругу на ЗП та напругу дотику. На ці величини впливають наступні фактори: конструктивне виконання ЗП, електрофізичні характеристики ґрунту та власні характеристики енергооб'єкту.

ЗП діючих високовольтних енергооб'єктів пред-

ставляє собою складну технічну систему, з розгалуженою сіткою горизонтальних та вертикальних заземлювачів, та розташовану на глибині, як правило, не менше 0,5 м. Моделювання аварійних режимів роботи для визначення його працездатності виконується при реальному струмі короткого замикання (КЗ) й дозволяє визначити значення НП навіть для тих об'єктів, які розташовані в стислій забудові або на території промислових підприємств.

Проте існуючі спеціальні розрахункові програми для моделювання режимів короткого замикання не враховують низку факторів, які впливають на точність визначення нормованих параметрів. Недостатня точ-

ність при визначенні НП може призвести до виходу із ладу дороговартісного обладнання, становити загрозу для безпеки обслуговуючого персоналу або ж призвести до значного завищення вартості ремонтно-відновлювальних робіт. Крім того, на електричних станціях та підстанціях України спостерігається активний перехід з релейно-контактної на мікропроцесорну техніку в системі релейного захисту, що ставить ще більш жорсткі умови до якості контролю працездатності заземлювальних пристроїв.

Метою роботи є розробка тестової версії програмного комплексу для визначення НП ЗП.

Матеріали дослідження. Новітній програмний комплекс для підвищення точності розрахунку НП запропоновано розробити на базі отриманих в [1] виразів для розрахунку потенціалу електричного поля нееквіпотенційного ЗП. Вказаний комплекс створюється з метою визначення НП ЗП при імітації однофазного замикання на землю (КЗ) на будь-яку одиницю обладнання підстанції.

Розрахунок НП ЗП можна поділити на три етапи:

- визначення реальної геоелектричної структури ґрунту та приведення її до виду еквівалентної розрахункової тришарової моделі за допомогою вбудованих в комплекс програм «VEZ-4A» та «EQ_MultiLayer» відповідно;
- розрахунок експерименту для оцінки адекватності побудованої моделі ЗП реальному ЗП за методикою наведеною в [2, 3];
- розрахунок НП ЗП в режимі КЗ.

Останні два етапи повинні мати однаковий алгоритм розрахунку й відрізняються лише вихідними даними розрахунку. З урахуванням відповідних доповнень до розробленого в [3] розрахункового алгоритму (див. рис. 1) роботи Grounding 1.0, в програмному середовищі Delphi було розроблено програмний комплекс "LiGro". На рис. 2 наведено інтерфейс розробленого комплексу з відкритим вікном запуску режиму моделювання режимів КЗ.

Від існуючих світових аналогів [4–12] для визначення НП ЗП діючих електричних станцій та підстанцій при розташуванні ЗП в тришаровому ґрунті вказаний програмний комплекс відрізняє:

- розрахунок електричного поля в комплексі відбувається на основі аналітичного рішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму у тришаровому напівпросторі;
- можливість довільної орієнтації заземлювача у просторі;
- врахування нееквіпотенційності заземлювачів;
- збереження тривалості розрахунку на рівні двошарових моделей.

Комплекс «LiGro» має широкі можливості та дозволяє:

- задати в будь-якому вузлі його індивідуальні властивості (клас напруги, місце КЗ, точки дотику, місце обслуговування, точки виміру експерименту, нейтраль з заданням струму в нейтралі для кожного

класу напруги, опір основи, початковий струм у вузлі);

– побудувати в масштабі заземлювальний пристрій з довільною конфігурацією (напрямки розміщення заземлювачів та їх переріз);

– проводити як групову, так і індивідуальну редакцію властивостей (координати, параметри і т.д.) об'єктів (вузлів та зв'язків);

– копіювати окремі елементи ЗП, створювати палітри стандартних елементів, автоматично будувати заземлювальні сітки з заданими параметрами, виконувати швидку навігацію схемою;

– визначити значення потенціалу електричного поля в кожному вузлі та струму в кожному заземлювачі (зв'язку);

– розрахувати експеримент для оцінки адекватності математичної моделі реальному ЗП як для всього ВРП, так і для окремих одиниць обладнання;

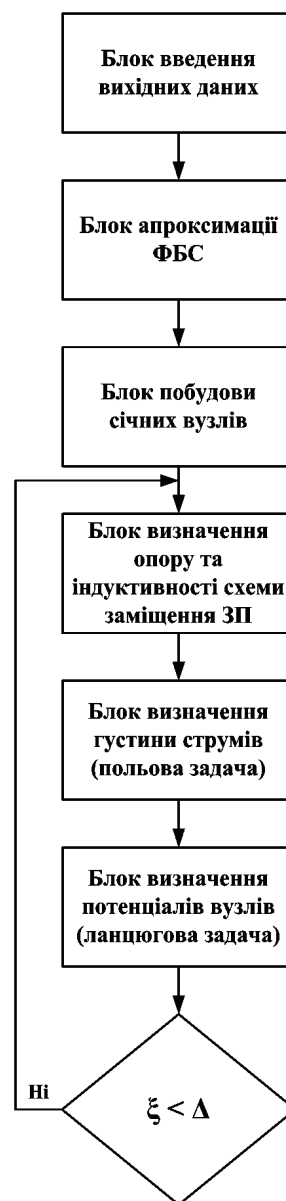


Рисунок 1 – Алгоритм роботи розрахункової частини програмного комплексу «LiGro»

– визначити значення потенціалу електричного поля в кожному вузлі та струму в кожному заземлювачі (зв'язку);

– розрахувати експеримент для оцінки адекватності математичної моделі реальному ЗП як для всього ВРП, так і для окремих одиниць обладнання;

– визначити напругу дотику, напругу на ЗП та опір ЗП на буд-якій з одиниць обладнання в будь-якому режимі однофазного КЗ на землю з урахуванням струму в заземлених нейтралях трансформаторів та наявності додаткових гальванічних зв'язків (трубопроводів, кабелів, порталів);

– проводити паралельний розрахунок експерименту, режимів КЗ та аналіз результатів розрахунку (завдяки розподілу цих напрямків на окремі потоки);

– можливість автоматичної побудови січних вузлів для врахування перетину заземлювачами границь поділу між шарами.

Слід зазначити, що виведення значення напруги в вузлах допомагає визначити місця прокладання додаткових заземлювачів для вирівнювання потенціалу на поверхні ґрунту та зменшення напруги дотику.

Оцінка адекватності розробленої моделі та створеного програмного комплексу проводилася шляхом порівняння результатів експериментальних досліджень для діючих високовольтних енергооб'єктів України з результатами розрахунку. При цьому значення експериментально визначеного опору ЗП та розрахованого за допомогою програмного комплексу «LiGro».

Для виконання вказаних досліджень була використана база даних з результатів ЕМД стану ЗП для 70

електричних підстанцій класом напруги 35 кВ, розташованих на півночі України. Вибір саме цих енергооб'єктів пояснюється наступним чином:

– підстанції, як правило, розташовані на відкритій місцевості й не мають гальванічного зв'язку з промисловими об'єктами (це забезпечує точність вимірювань);

– ґрунти місцевості, де розташовані об'єкти мають широкий діапазон значень питомого опору та їх співвідношення й дозволяють оцінити всі типи ґрунтів (наприклад, мінімальне й максимальне значення питомого опору першого шару лежить в діапазоні від 17 Ом·м до 5690 Ом·м);

– відсутність підземних комунікацій дозволила отримати криві ВЕЗ високої якості;

– всі виміри на кожній з підстанцій автор проводив особисто;

– всі підстанції входять до складу одного об'єкта.

При виконанні досліджень було порівняно отримані експериментальним шляхом значення $R_{ЗП}$ з отриманими розрахунковим способом за допомогою двошарової моделі програмного комплексу «Grounding 1.0» [4, 12] та за допомогою створеного програмного комплексу «LiGro» вибірку для 70 підстанцій результатів вимірів $R_{ЗП}$, розрахунку двошаровою $R_{ЗП2}$ та $R_{ЗП3}$ тришаровою моделлю відповідно, а також електрофізичні характеристики ґрунту, отримані при проведенні ВЕЗ ґрунту. Для наочності аналогічні дані для перших п'яти підстанцій наведено в табл. 1.

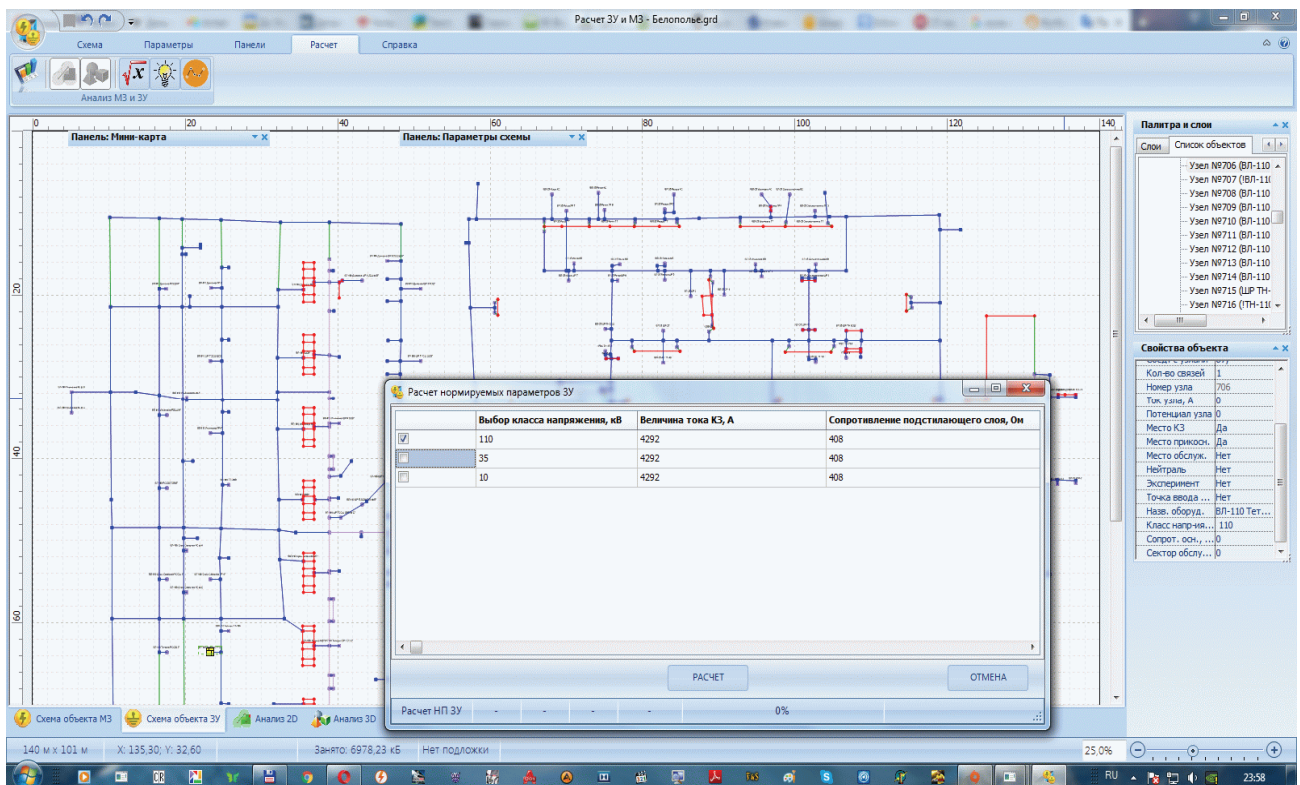


Рисунок 2 – Интерфейс программного комплексу «LiGro»

Таблиця 1 – Результати експериментального та розрахункового визначення опору ЗП для перших п'яти підстанцій

ПС	$R_{ЗП\epsilon}$, Ом	$R_{ЗП2}$, Ом	$R_{ЗП3}$, Ом	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м	ПС	$R_{ЗП\epsilon}$, Ом	$R_{ЗП2}$, Ом	$R_{ЗП3}$, Ом	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м
1	0,62	0,5953	0,6440	53,0	28,0	15,0	1,9	9,2	36	5,60	6,1330	5,5270	910,0	260	164	0,4	2,0
2	0,70	0,7490	0,7349	44,0	28,0	50,0	1,4	13,2	37	1,17	1,2360	1,3460	195,0	44,0	75,0	0,9	2,6
3	1,27	2,0840	1,5300	160,0	49,0	190,0	0,4	8,9	38	1,00	0,7290	0,7705	35,0	60,0	30,0	0,2	0,7
4	0,75	0,7149	0,6840	68,0	36,0	14,0	0,7	10,7	39	0,62	0,5410	0,6840	22,5	50,0	19,0	0,2	9,2
5	0,60	0,5419	0,6788	69,0	12,5	60,3	1,1	9,0	40	1,00	0,8850	0,9040	49,0	63,0	24,0	0,7	6,5
6	0,99	0,9278	0,9138	55,0	43,5	23,0	0,6	6,9	41	1,15	1,2500	1,2270	108,0	50,0	24,0	0,9	4,9
7	0,96	1,1520	1,2520	73,0	30,0	61,0	2,0	9,0	42	9,70	9,0000	8,3720	1150	20,0	900,0	1,4	3,2
8	1,16	1,3040	1,2180	166,5	38,0	90,0	0,5	6,1	43	1,33	2,4280	1,4670	320,0	27,0	250,0	0,4	5,0
9	0,81	0,9386	0,9175	72,8	22,0	34,4	1,2	5,5	44	2,60	2,9180	2,6620	47,0	800,0	250,0	2,4	4,1
10	1,06	1,6070	1,3960	210,0	72,0	60,0	0,3	1,0	45	0,99	0,8840	0,8390	44,0	26,6	71,0	2,1	15,4
11	1,12	1,2440	1,2060	550,0	36,0	46,0	0,4	4,2	46	0,90	1,2900	0,9520	49,8	19,0	220,0	1,9	15,9
12	0,39	0,6461	0,6448	60,0	12,0	20,0	3,5	11,0	47	1,79	1,8620	1,7920	195,0	60,0	125,0	0,5	7,5
13	2,37	2,3180	2,4650	610,0	31,0	115,0	0,6	1,5	48	1,25	1,7960	1,4910	73,0	28,0	139,5	1,2	3,8
14	0,96	0,5622	0,7640	17,0	49,5	21,0	0,2	4,7	49	0,50	0,5230	0,5225	54,0	64,0	18,0	0,2	1,9
15	0,88	1,0240	1,1110	50,0	21,0	46,5	1,8	4,9	50	2,00	2,5260	2,5240	120,0	47,0	210,0	0,8	1,5
16	0,87	0,4934	0,7422	34,0	2,0	2000	1,1	5,5	51	0,53	0,7412	0,8197	74,0	26,2	52,0	1,1	3,1
17	0,61	0,5522	0,5600	42,7	20,0	34,0	1,8	12,8	52	0,67	0,8287	0,9077	65,0	35,4	140,0	0,6	16,8
18	0,87	0,7781	0,8280	79,0	35,0	30,0	1,3	4,3	53	0,56	0,5375	0,5917	25,0	42,0	14,0	0,1	12,1
19	0,78	0,8820	0,8490	41,0	59,0	33,5	0,3	2,0	54	0,76	0,8873	0,8980	49,0	17,6	39,0	1,0	17,0
20	0,60	0,6185	0,6017	27,0	41,0	15,0	1,3	12,8	55	1,10	0,8556	0,9265	159,1	21,0	55,0	1,8	26,9
21	7,20	8,2160	7,5430	1250	1770	130,0	0,4	1,4	56	0,95	1,5750	1,0320	350,0	45,0	77,0	0,4	4,0
22	1,20	1,4590	1,3160	95,0	55,0	35,0	0,4	11,0	57	0,63	0,6615	0,6300	48,0	23,0	79,0	1,5	15,5
23	0,84	1,5790	0,9610	980,0	100,0	30,0	0,6	3,2	58	0,44	0,5143	0,4982	56,6	18,0	20,0	2,9	12,8
24	1,09	1,3980	1,2330	101,4	160,0	30,0	0,9	5,5	59	0,53	0,5849	0,6400	95,0	35,0	14,2	0,8	12,0
25	0,79	0,7408	0,7919	33,0	58,0	21,0	0,1	11,4	60	10,1	9,5910	10,100	4400	765,0	101,0	0,8	5,3
26	0,71	0,6598	0,5931	82,0	31,5	13,0	0,4	7,4	61	3,81	3,9690	3,8020	950,0	240,0	80,0	0,3	17,3
27	0,70	0,6848	0,7046	66,0	36,3	16,5	1,4	19,4	62	2,80	2,8400	2,8330	200,0	62,0	450,0	0,4	8,4
28	1,37	1,6610	1,3720	47,7	136,0	60,8	2,0	9,1	63	0,68	0,7406	0,6940	28,5	17,0	120,0	7,0	11,0
29	0,90	0,9658	0,9637	91,0	29,0	41,8	2,1	12,6	64	0,87	0,9517	1,0060	61,0	12,5	31,0	1,7	4,2
30	2,60	2,2500	2,7460	65,0	450,0	80,0	0,7	1,7	65	1,06	1,4530	1,1360	460,0	37,8	77,0	0,5	6,6
31	0,30	0,3829	0,3270	36,0	28,0	16,2	0,5	2,2	66	2,27	2,1710	2,1730	515,0	132,0	93,0	0,3	2,7
32	0,50	0,5170	0,4815	36,0	8,4	180,0	1,5	25,0	67	1,74	1,9320	1,7310	210,0	28,5	130,0	1,7	12,2
33	21,1	17,660	23,660	5690	1200	260,0	0,9	5,2	68	0,99	1,2800	1,1820	63,0	49,0	13,0	0,7	8,1
34	0,61	0,6879	0,6903	65,0	85,0	37,0	0,2	1,2	69	0,61	0,7621	0,7084	47,0	48,0	24,0	0,8	9,0
35	1,29	1,0730	1,2200	68,0	90,0	38,0	0,2	1,0	70	0,56	0,5695	0,5713	102,0	44,0	13,0	0,6	5,2

Слід відзначити що для досить значної кількості підстанцій характерним виявився чотиришаровий ґрунт і для виконання розрахунків довелося застосовувати методику еквівалентування з приведенням ґрунту до розрахункових дво- та тришарових моделей. Зокрема це виявилось характерним для ПС №5, №7, №9, №10, №15, №17, №24, №25, №28, №37, №39, №45, №52, №55, №56, №57, №58, №61, №62 та №67 (див. табл.1). Заземлювачі ПС №50 розташовані в п'ятишаровому ґрунті. Для всіх інших енергооб'єктів характерною є тришарова структура ґрунту.

Як видно з результатів розрахунку для абсолютної більшості випадків похибка розрахунку за допомогою створеного програмного комплексу «LiGro» δ_3 є меншою у порівнянні з δ_2 (розрахунок за допомогою двошарової моделі [12]). Це спостерігається у 71 % підстанцій. Крім того, слід відзначити, що у абсолютній більшості випадків (близько 74 %) для тришарової моделі похибка є додатною величиною. Це пов'язано з тим, що при моделюванні не було враховано роботу природних заземлювачів (фундаментів обладнання та тросових блискавковідводів, можливих приєднань до зовнішньої металевої огорожі тощо).

Однак для шести підстанцій фіксується значна

похибка ($\delta_3 > 25\%$) при визначенні опору ЗП. Для чотирьох з них (а саме ПС №10, №15, №50 та №52) це пояснюється впливом методичної похибки, яка виникла при використанні методики еквівалентування для приведення чотири- та п'яти шарової структури до розрахункової тришарової.

В інших двох випадках значна похибка пояснюється виносом потенціалу за межі електроустановки для ПС №12 по кабелям, а для ПС №50 по двом тросовим блискавковідводам, які в свою чергу приєднані до опор повітряних ліній класом напруги 35 кВ й грають роль природних додаткових заземлювачів. Для зменшення такої похибки й врахування виносів потенціалу необхідно проводити додаткові дослідження.

Таблиця 2 – Порівняння точності визначення опору ЗП для 64 підстанцій

Тип моделі:	Середня похибка $\delta_{\text{ср}}$, %	Кількість підстанцій, які потрапили в діапазон похибки, шт			
		$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$
двошарова [12]	17,6	14	28	41	46
тришарова «LiGro»	9,1	21	39	50	59

Враховуючи вище наведене пропонується провести аналіз модуля похибки розрахунку опору ЗП у порівнянні з експериментальним значенням без врахування зазначених шести підстанцій. Результати аналізу для вибірки з 64 підстанцій наведено в табл. 2.

Як бачимо з табл. 2 програмний комплекс «LiGro», який створено на основі математичної моделі нееквіпотенційного ЗП розташованого у тришаровому ґрунті, має значно меншу середню похибку (в 1,9 рази) у порівнянні з двошаровою моделлю [8] при визначенні опору ЗП, для якого фіксується більша кількість потраплянь визначених значень опору ЗП в припустимі діапазони похибки (в середньому на 31 %). Особливо це характерно для діапазонів $\pm 5\%$ та $\pm 10\%$, де кількість таких потраплянь збільшилась на 50 % та 39 % відповідно.

Висновок

1. Створено новітній програмний комплекс «LiGro» для визначення НП при імітації режимів КЗ на основі розробленої математичної моделі нееквіпотенційного ЗП, розташованого у тришаровому ґрунті. Показано, що за своїми параметрами комплекс відповідає світовим аналогам, а за рядом функцій та властивостей перевищує їх, що дозволяє використовувати його як інструмент при контролі стану ЗП діючих та проєктованих енергетичних об'єктів.

2. Доведена адекватність створеного програмного комплексу на основі порівняння результатів експериментальних досліджень для діючих високовольтних енергооб'єктів України з результатами розрахунку. Показано, що середня похибка визначення опору ЗП не перевищує 10 %, а при визначенні напруги дотику фіксується потрапляння у розрахунковий діапазон для понад 94 % експериментальних точок.

Список літератури

1. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Определение электрического потенциала, создаваемого заземляющим устройством в трехслойном грунте. Технічна електродинаміка. 2018. № 4. С. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.019>
2. Глебов О.Ю., Колиушко Д.Г., Линк И.Ю. Определение напряжения прикосновения методом суперпозиции составляющих тока однофазного замыкания на землю. Вестник НТУ «ХПИ». 2005. № 49. С. 85-88.
3. Глебов О.Ю. та ін. Диагностика заземляющих устройств и систем молниезащиты объектов электроэнергетики на современном этапе. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2015. № 51 (1160). С. 16-24.
4. Колиушко Д.Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электроэнергообъектов : дис. ...канд. техн. наук: 05.11.13. Харків: 2003. 172 с.
5. Tabatabaei N.M., Mortezaeei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». 2010. № 1. P. 45-49.
6. Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis. NACE Milano Italia Section – Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry». 17 p.
7. Zubov K.H. Совершенствование расчетных методов молниезащиты и заземляющих устройств в неоднородных

грунта : дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03. Вологда: 2011. 158 с.

8. Chikarov Y., Tjing Lie T., Nair N. Safety parameters of grounding devices at an electric power plant. Electrical and Electronics Engineering: International Journal (EELIJ). 2013. Vol 2, No 1. P. 1-20.

9. Rajesh Kumar, Kamal Bansal, Devender Kumar Saini, I.P.S. Paul Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air Insulated and Gas Insulated Substations. Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9 (28). P. 1-7. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i28/96515

10. Huang H. et al. Analysis of a Large Grounding System and Subsequent Field Test Validation Using the Fall of Potential Method. Energy and Power Engineering. 2013. № 5. P. 1266-1272. doi:10.4236/epe.2013.54B240

11. Zhong-Xin Li, Ke-Li Gao, Yu Yin, Cui-Xia Zhang, Dong Ge Numerical Calculation for Lightning Response to Grounding Systems Buried in Horizontal Multilayered Earth Model Based on Quasi-Static Complex Image Method. Computational and Numerical Simulations. 2014. Chapter 18. P. 393-418. doi:10.5772/57049.

12. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте. Электронное моделирование. 2003. Т. 25, № 2. С. 99-111.

References (transliterated)

1. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Determination the electrical potential of a created grounding device in a three-layer ground. Technical Electrodynamics. 2018. No. 4. P. 19-24. (Rus). doi: 10.15407/techned2018.04.019
2. Glebov O.Yu., Koliushko D.G., Link I.Yu. Determination of the touch voltage by the method of superposition of current components of a single-phase earth fault. Bulletin of NTU «KhPI». 2005. No.49. P. 85-88. (Rus).
3. Glebov O.Yu. et al. Diagnostics of grounding devices and lightning protection systems of electric power facilities at the present stage. Bulletin of NTU «KhPI». 2015. No.51. P. 16-24. (Rus).
4. Koliushko D.G. Improving the diagnosis of grounding devices elektroenergoobektov: author's abstract of Can. tech. sci. diss. 05.11.13. Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet Kharkivskiy Polytekhnichnyi Instytut. Kharkiv: 2003. 172 p. (Rus)
5. Tabatabaei N.M., Mortezaeei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». 2010. Iss.2, vol.2, no.1. P. 45-49.
6. Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis NACE Milano Italia Section : Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry». 2016. 17 p.
7. Zubov K.N. Improved computational methods for lightning protection and grounding devices in heterogeneous soil: author's abstract of Can. tech. sci. diss. 05.09.03. Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Vologda. 2011. 158 p. (Rus).
8. Chikarov Y., Tjing Lie T., Nair N. Safety parameters of grounding devices at an electric power plant. Electrical and Electronics Engineering: International Journal (EELIJ). 2013. Vol 2, no 1. P. 1-20.
9. Rajesh Kumar, Kamal Bansal, Devender Kumar Saini, Paul I.P.S. Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air

Insulated and Gas Insulated Substations. Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol 9 (28). P. 1-7. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i28/96515

10. Huang H. Analysis of a Large Grounding System and Subsequent Field Test Validation Using the Fall of Potential. Energy and Power Engineering, 2013, no 5, pp. 1266-1272. doi:10.4236/epe.2013.54B240

11. Zhong-Xin Li, Ke-Li Gao, Yu Yin, Cui-Xia Zhang, Dong Ge Numerical Calculation for Lightning Response to

Grounding Systems Buried in Horizontal Multilayered Earth Model Based on Quasi-Static Complex Image Method. Computational and Numerical Simulations. 2014. Chapter 18. P. 393-418. doi:10.5772/57049.

12. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer. Electronic modeling. 2003. Vol.25, no.2. P. 99-111. (Rus).

Надійшла (received) 07.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Руденко Сергій Сергійович (Руденко Сергей Сергеевич, Rudenko Serhiy) – кандидат технічних наук, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-2544-1545>; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Коліушко Денис Георгійович (Коліушко Денис Георгиевич, Koliushko Denys) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», старший науковий співробітник кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3112-4260> e-mail: denny4791@kpi.kharkov.ua

Істомін Олександр Євгенович (Истомин Александр Евгеньевич, Istomin Alexandr) – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин імені О.О. Морозова; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5709-6459>; e-mail: istomin@kpi.kharkov.ua